干旱区研究
ARID ZONE RESEARCH

doi:10.13866/j.azr.2018.06.04

基于水土流失评价的高寒草甸经营模式比较①

马素洁[1,2]，贾生海[1]，花立民[1]
(1. 甘肃农业大学,甘肃 兰州 730070;2. 西藏农牧学院动物科学学院,西藏 林芝 860100)

摘 要: 选择甘肃省单户草地经营为主的天祝县和联户经营为主的合作市为研究区,采用 RS 和 GIS 技术并根据 RULSE 土壤流失模型,计算两地 10 a 间(2004—2014 年)的草地土壤侵蚀模数,研究两地降雨、农牧业人口、家畜数量和畜牧业产值与水土流失的相关性,并用排除法分析造成两县草地土壤侵蚀模数差异的原因。结果显示:① 天祝县和合作市土壤侵蚀现状以微度侵蚀为主;② 天祝县年均土壤侵蚀模数比合作市高 7.21 $t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$,10 余年土壤侵蚀增加速率为合作市的 4 倍,各草地类型平均土壤侵蚀模数比合作市增长更快;③ 天祝县年降雨量与草地平均土壤侵蚀模数成显著正相关($R = 0.737, P < 0.05$),合作市农牧业人口与草地平均土壤侵蚀模数成显著负相关($R = -0.829, P < 0.05$);④ 两县草地平均侵蚀模数差值与年降雨量差值不存在相关性($P > 0.05$),合作市家畜超载率高于天祝县。认为草地经营模式是造成草地退化、水土流失的主要原因,且草地联户经营模式在防止水土流失方面优于单户经营模式。

关键词: 土壤侵蚀; 草地经营模式; 水土流失; 高寒草甸; 甘肃

水土流失是指在自然营力和人类活动作用下,水土资源和土地生产力的破坏和损失[1]。我国是世界上水土流失最严重的国家之一,全国水土流失面积为 3.67×10^6 km^2,占国土面积的 38%。西北地区水土流失面积最大,2000 年水土流失总面积为 2.96×10^6 km^2,占全国水土流失总面积的 83.1%[2]。已有研究表明全球 80% 的水土流失发生在草地[3],我国西部潜在或已发生水土流失面积的 63.19% 是草地[4],人类活动是造成草地水土流失的主要因素[5-6]。荣浩等以内蒙古荒漠草地为研究对象,认为超载过牧、滥采乱挖等人为因素是造成草地水土流失的主要原因[5]。吕少宁等[6]认为,"围栏放牧"制度严重破坏生态环境,是造成黄河源区玛曲草原退化的主要原因。曹建军[7]也认为,草地经营模式改变草地利用方式,是造成草地退化的主要因素。草地退化将加剧水土流失,因此草地经营模式与水土流失有着密切关系。

我国实行草地家庭承包制度已有 30 余年。由于历史和现实原因,不同牧区形成了不同的草地经营管理模式,主要有单户和联户经营管理模式两种[8]。单户经营管理模式是将草地承包给单个牧户,牧户草地之间通常用围栏划界,以家庭为单位管理和使用。联户经营管理模式则以自然村或组为单位,牧户联合起来统一放牧管理草地[8]。一些学者认为,联户经营模式在降低载畜量和提高生产效益等方面优于单户经营模式[9],但不同经营模式对草地水土流失影响,特别是较长时间尺度定量分析未见报道。为此,本文以甘肃省单户经营模式的天祝县和联户经营模式的合作市为研究区域,采用修正的土壤流失模型将土壤侵蚀量化,对比分析 2004—2014 年两地水土流失状况,以及气候、经济发展和劳动力状况等对水土流失的影响,从草地经营管理模式对水土流失影响的角度出发,为完善草地经营管理政策提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区选择以单户经营模式为主的天祝县和联户经营模式为主的合作市(图 1)。天祝县位于甘肃省武威市东南部,海拔 2 050 ~4 874 m,年平均气温 −8 ~4 ℃,相对无霜期 90 ~ 145 d,年降雨量 265 ~ 632 mm。合作市位于甘南北部,海拔2 400 ~4 500 m,

① 收稿日期: 2018−03−11; 修订日期: 2018−09−26
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504803,2016YFC0501902);甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目
作者简介: 马素洁(1990−),女,讲师,主要从事草地生态与水土保持研究. E-mail:yixianshilly@163.com
通讯作者: 花立民. E-mail:hualm@gsau.edu.cn

年平均气温 -0.5 ~3.5 ℃,平均无霜期为 48 d,年平均降雨量 545 mm。两县均属大陆性高原气候,主要草地类型均为高寒草甸,均属于轻、中度生态系统脆弱区[10]。根据甘肃省 2011 年统计年鉴和 2010 年土地利用空间数据,可统计两地 2010 年单位县域面积人口和草地资源状况(表 1)。

1.2 水土流失模型选择

依据修正土壤流失方程(reversed universal soil loss equation,RUSLE),并利用 RS 和 GIS 技术来量化研究区土壤侵蚀,公式[13]为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中:A 为年土壤侵蚀模数($t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$);$R$ 为降雨侵蚀力因子,国际单位制为($MJ \cdot mm \cdot km^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$);$K$ 为土壤可蚀性因子,国际单位制为($t \cdot km^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot km^{-2}$);$L$ 为坡长因子;S 为坡度因子;C 为植被覆盖与管理因子;P 为水土保持措施因子。

1.2.1 降雨侵蚀力因子(R) 降雨侵蚀力因子指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。本研究采用每月降雨量与年降雨量模比系数(P_i^2/P)的方法估算年 R 值,即 Wischmeier[14] 等经验公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.5 \times \lg (P_i^2/P) - 0.818\,8]} \tag{2}$$

式中:P_i 为各月平均降雨量(mm);P 为年降雨量(mm)。

根据公式计算甘肃省和青海省各气象站点 R 值后,利用协同克里金插值法进行空间插值,获得 R 因子图。

1.2.2 土壤可蚀性因子(K) 土壤可蚀性是土壤侵蚀的内因[15]。本文采用 Williams 等提出的 EPIC 模型[16],利用土壤有机碳和粒径大小计算土壤可蚀性 K 值,公式如下:

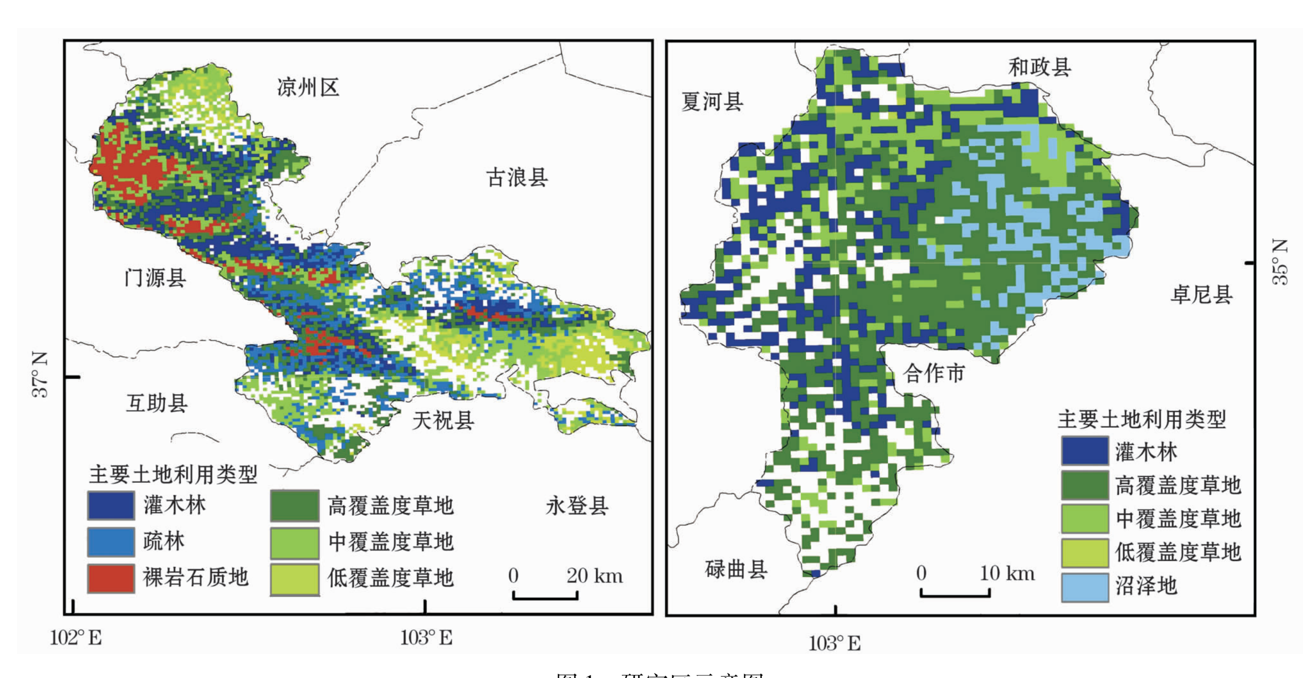


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

表 1 2010 年研究区常住人口、草地资源现状

Tab. 1 Permanent resident population and the grassland resources in the study area in 2010

研究区	县域面积 /km²	常驻人口 /10⁴ 人	草地和灌木林		草地类型[11-12]
			人均面积 /(m²·人⁻¹)	占县域面积比 /%	
天祝县	7 149	17.48	24.32	59.47	温性草原、山地草甸、高寒草甸、灌丛草甸和疏林草甸
合作市	2 670	9.03	22.44	75.9	高寒草甸、山地草甸、灌丛草甸、沼泽草甸、疏林草甸、山地草原和盐生草甸

$$K=\{0.2+0.3\exp[-0.0256SAN(1-SIL/100)]\}\times[SIL/(SLA+SIL)]^{0.3}\times \{1-0.25C/[C+\exp(3.72-2.95C)]\}\times(1-0.7SN1)/[SN1+\exp(-5.51+22.9SN1)] \quad (3)$$

式中:SAN 为砂粒(2 ~0.1 mm)含量(%);SIL 为粉粒(0.1 ~ 0.002 mm)含量(%);SLA 为黏粒(<0.002 mm)含量(%);C 为土壤有机碳含量(%)=有机质含量(%)/1.724;$SN1=1-\frac{SAN}{100}$。土壤机械组成数据提取于中国土壤质地空间分布数据,土壤有机质数据提取于全国 1∶1 000 000 土壤有机质图,经过栅格代数运算得到 K 因子图。

1.2.3 地形因子(LS) 坡长因子 L 和坡度因子 S 综合反映了地形对土壤侵蚀的影响[17]。坡长因子 L 计算公式[13]如下:

$$L=\left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m \quad (4)$$

式中:L 为坡长因子;λ 为坡长;m 为坡长指数,计算公式为:

$$m=\frac{\beta}{1+\beta} \quad (5)$$

$$\beta=\frac{\frac{\sin\theta}{0.0896}}{[3.0(\sin\theta)^{0.8}+0.56]} \quad (6)$$

式中:θ 为坡度角。

坡度因子 S 计算公式[18]如下:

$$S=10.8\sin\theta+0.03,\quad \theta<5° \quad (7)$$

$$S=16.8\sin\theta-0.50,\quad 5°\leqslant\theta<14° \quad (8)$$

根据 Liu 等[19]对 S 因子的修改,计算公式如下:

$$S=20.91\sin\theta-0.90,\quad \theta\geqslant14° \quad (9)$$

利用 ArcGIS 软件将 DEM 数据根据公式(4 ~9)进行栅格计算,得到 LS 因子图。

1.2.4 植被覆盖与管理因子(C) 植被覆盖与管理因子(C)是侵蚀动力的抑制因子[20]。本研究采用卜兆宏等提出的 C 值计算公式[21],即:

$$C=0.4149-0.0052c \quad (10)$$

式中:C 为植被与管理因子;c 为 7 月植被覆盖度(%)。

其中,植被覆盖度计算公式为[22]:

$$C=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \quad (11)$$

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (12)$$

式中:NDVI 为像元归一化植被指数;$NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为研究区 NDVI 的最大最小值;NIR 为近红外波段的反射率;R 为红光波段的反射率。

利用 ENVI 软件对研究区 Landsat 7/ETM + 影像数据进行处理,计算植被覆盖度,根据公式(10)得到 C 因子图。

1.2.5 水土保持措施因子(P) 研究区为牧区,主要土地类型为草地,P 因子[23]可通过对土地利用类型图赋值来获取(表 2)。

1.3 数据来源及处理

1.3.1 数据来源 本研究应用到的数据主要包括 6 期(2004 年、2006 年、2008 年、2010 年、2012 年、2014 年)的降水数据、6 期 Landsat 7/ETM + 影像数据、2010 年土地利用数据、30 m 分辨率的 DEM 数据、中国土壤质地空间分布数据、全国 1∶1 000 000 土壤有机质图、6 a 甘肃省统计年鉴数据以及其他基础地理数据。其中全国 1∶1 000 000 土壤有机质图来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统数据共享平台—土壤科学数据中心(http://soil.geodata.cn),2010 年土地利用数据、DEM 数据、中国土壤质地空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

1.3.2 数据处理 草地平均土壤侵蚀模数差值(ΔA_i)=天祝县草地平均土壤侵蚀模数(ΔA_{1i})-合作市草地平均土壤侵蚀模数(ΔA_{2i}),i 为 2004,2006,2008,2010,2012,2014。利用 RUSLE 模型计算两县 10 余年间土壤侵蚀模数过程中,时间序列数据仅有降雨数据和植被覆盖数据,所以 ΔA_i 仅受降雨和植被覆盖度影响。同时气候因子(降雨)、超载过牧、草地经营模式又是公认的造成草地植被覆盖度变化的主要因素,因此引起 10 余年内 ΔA_i 变化的因素拟为降雨、超载过牧和草地经营模式。

表 2 各用地类型 P 值

Tab. 2 P values of various land use types

土地利用类型	P	土地利用类型	P
水浇地	0.1	城乡、工矿、居民用地	0.3
林地	1	水域	0
草地	1	未利用地	1

利用 ArcGIS 软件将各因子栅格图根据公式(1)进行栅格代数运算得到,土壤侵蚀模数 A 栅格图,并统计各土地利用类型平均土壤侵蚀模数,绘制土壤侵蚀模数分布图;侵蚀级别按照土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007 划分。另外,为便于统计研究区的土壤侵蚀动态,根据不同程度放牧草地的土壤侵蚀模数情况[24],将微度侵蚀分为 4 个级别:1~1($A<10$)、1~2($10<A<50$)、1~3($50<A<100$)、1~4($100<A<200$)、单位为 $t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$;各区域水土流失量的年际趋势变化采用 Excel 进行绘制和分析;相关性分析采用 SPSS 19.0 Pearson 单侧相关性分析法。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤流失量及年际变化趋势

2.1.1 天祝县土壤流失量及年际变化趋势 2004—2014 年,天祝县土壤侵蚀总量呈总体上升趋势,2012 年最高达到 111 359.705 $t \cdot a^{-1}$,2014 年土壤侵蚀总量较 2004 年增长了 43.64%(表 3)。从侵蚀程度演变来看,天祝县最主要的侵蚀级别为微度侵蚀,占全县土地面积的 98% 以上。1~1 级微度侵蚀面积最大,占全县总面积的 59% 以上,且侵蚀面积呈急剧下降趋势,而 1~2 级微度侵蚀面积则呈逐年上升趋势,说明该县10余年间侵蚀模数小于

表 3 2004—2014 年天祝县土壤流失量分级统计

Tab. 3 The classified statistics of soil erosion in Tianzhu County during the period from 2004 to 2014

侵蚀级别		侵蚀模数 /($t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$)	2004 年		2006 年		2008 年		2010 年		2012 年		2014 年	
			面积 /km^2	百分比 /%	面积 /km^2	百分比 /%	面积 /km^2	百分比 /%	面积 /km^2	百分比 /%	面积 /km^2	百分比 /%	面积 /km^2	百分比 /%
Ⅰ微度侵蚀	1~1	<10	4 600.45	71.38	4 173.75	64.89	3 786.79	58.76	4 065.72	63.21	3 843.53	59.64	4 020.75	63.15
	1~2	10~50	1 518.85	23.57	1 721.00	26.76	2 089.79	32.43	1 922.55	29.89	1 963.37	30.46	1 814.43	28.50
	1~3	50~100	275.87	4.28	426.59	6.63	498.37	7.73	400.15	6.22	436.97	6.78	405.38	6.37
	1~4	100~200	48.67	0.76	109.42	1.70	69.08	1.07	43.55	0.68	189.05	2.93	121.4	1.91
Ⅱ轻度侵蚀		200~2 500	0.95	0.01	1.67	0.03	0.75	0.01	0.45	0.01	11.87	0.18	5.05	0.08
侵蚀总量/($t \cdot a^{-1}$)			66 173.912		91 500.332		99 256.605		85 118.826		111 359.705		95 054.979	

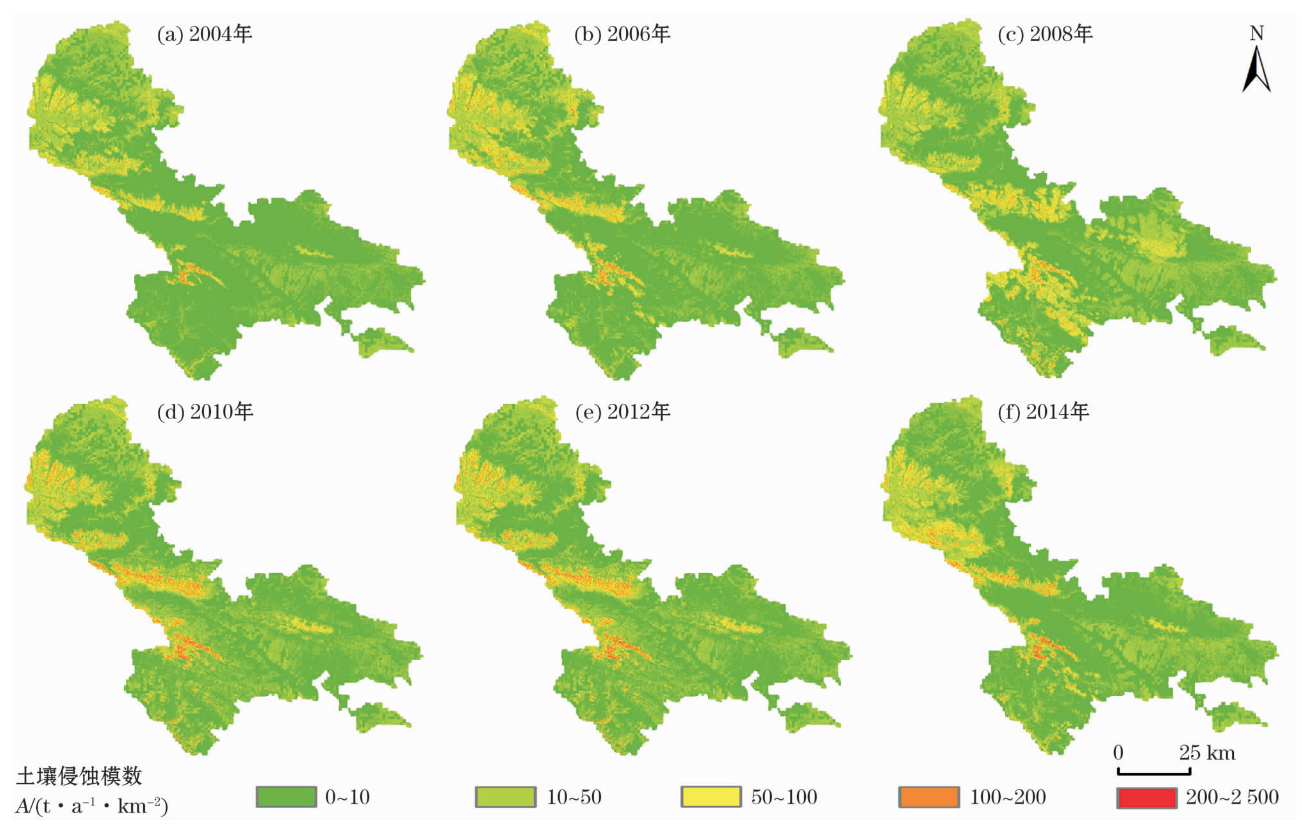


图 2 2004—2014 年天祝县土壤侵蚀空间分布

Fig 2 The spatial distribution of soil erosion in Tianzhu County from 2004 to 2014

$10\ t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$的区域侵蚀加剧。到2014年，1～1级至1～4级微度侵蚀面积分别占全县土地面积的63.15%、28.5%、6.37%、1.91%。

从空间分布格局变化趋势来看(图2)，天祝县共有5片主要侵蚀区，包括旦马乡、祁连乡和毛藏乡交界处，毛藏乡南部、哈溪镇南部、抓喜秀龙乡和炭山岭镇交界处以及西大滩乡南部；从2004—2014年，土壤侵蚀以这5片主要侵蚀区为中心不断向周边扩展。区域的空间分布呈现出北部侵蚀较南部剧烈的态势，这主要与天祝县的土地利用类型、海拔和植被盖度有关。北部、中部海拔较高的裸岩石质地、低覆盖度和中覆盖度草地、灌木林地区侵蚀强度剧烈；中南部地势平坦的草地、林地和旱地区域土壤侵蚀强度较轻。

2.1.2　合作市土壤流失量及年际变化趋势

2004—2014年，合作市土壤侵蚀总量呈总体上升趋势(表4)，2006年最高达到18 708.112 $t \cdot a^{-1}$，2008年最低值为9 002.177 $t \cdot a^{-1}$，2014年土壤侵蚀总量较2004年增长了13.09%。从侵蚀程度演变来看(表4)，各年微度侵蚀面积占全市总面积的98%

表4　2004—2014年合作市土壤流失量分级统计

Tab. 4　The classified statistics of soil erosion in Hezuo City from 2004 to 2014

侵蚀级别		侵蚀模数/($t \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$)	2004年		2006年		2008年		2010年		2012年		2014年	
			面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%
Ⅰ微度侵蚀	1～1	<10	1 723.38	82.8	1 590.97	76.44	1 819.52	87.42	1 744.36	83.81	1 602.86	77.01	1 595.69	78.07
	1～2	10～50	293.28	14.09	403.98	19.41	232.79	11.18	275.85	13.25	392.27	18.85	397.19	19.43
	1～3	50～100	53.07	2.55	74.73	3.59	26.21	1.26	49.64	2.38	70.1	3.37	44.52	2.18
	1～4	100～200	11.22	0.54	11.62	0.56	2.78	0.13	11.27	0.54	15.22	0.73	6.52	0.32
Ⅱ轻度侵蚀		200～2 500	0.38	0.02	0.03	0	0.02	0	0.2	0.01	1.01	0.05	0.03	0
侵蚀总量/($t \cdot a^{-1}$)			13 818.683		18 708.112		9 002.177		13 110.433		18 601.729		15 626.975	

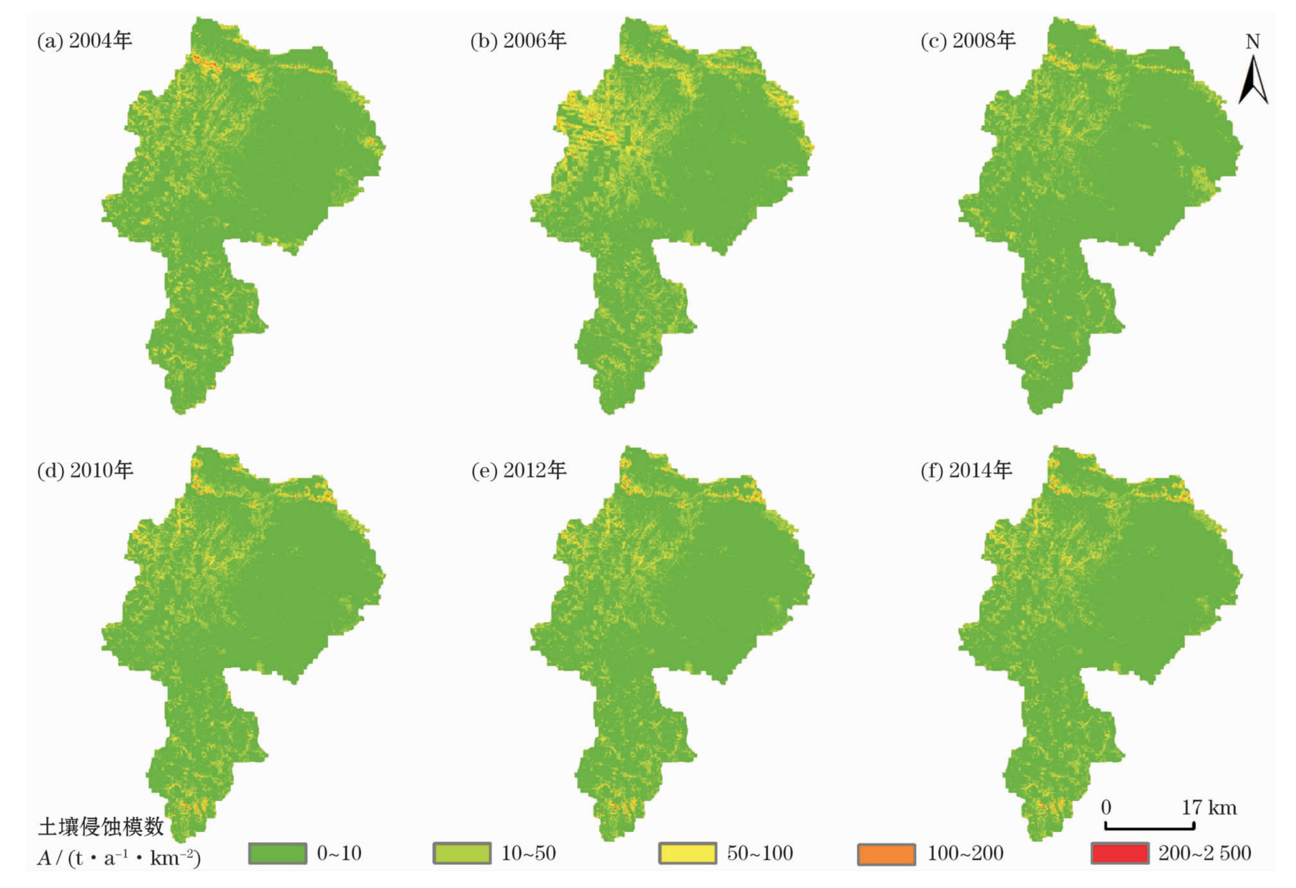


图3　2004—2014年合作市土壤侵蚀空间分布

Fig. 3　The spatial distribution of soil erosion in Hezuo City from 2004 to 2014

以上。1～1级微度侵蚀面积最大，占全市总面积的76%以上，且侵蚀面积呈平缓下降趋势，而1～2级微度侵蚀面积呈增长趋势，说明该县10余年间水土流失加剧。到2014年1～1级至1～4级微度侵蚀面积分别占全县土地面积的78.07%、19.43%、2.18%和0.32%。

从空间分布格局变化趋势来看(图3)，合作市点状侵蚀现象明显，主要分布在合作市北部的卡加道乡和卡加曼乡以及南部的勒秀乡，佐盖多玛乡土壤侵蚀现象最轻；从2004—2014年，合作市侵蚀区域以侵蚀点为中心向四周发展，特别是那吾乡的南部、勒秀乡和佐盖玛乡西部，另外佐盖多玛乡中部出现大面积的集中连片的侵蚀加剧现象。点状侵蚀区土地利用类型主要位于农牧交错区域的低覆盖度草地和中覆盖度草地，以及地势较高区域的灌木林；连片侵蚀加剧区域土地利用类型主要为沼泽草甸；土地利用类型为高、中覆盖度草地和林地区域土壤侵蚀加剧不明显。

2.2 研究区年均土壤侵蚀模数及各土地利用类型土壤侵蚀比较

2.2.1 年均土壤侵蚀模数比较　天祝县和合作市两地10余年间土壤侵蚀模数都呈增加趋势(图4)，合作市年均土壤侵蚀模数年际变化剧烈，呈缓慢增加趋势，而天祝县年均土壤侵蚀模数明显增加，增长速率为合作市的4倍多。2014年天祝县和合作市年均土壤侵蚀模数分别为14.93 t·a^{-1}·km^{-2}、7.64 t·a^{-1}·km^{-2}，10a间天祝县年均土壤侵蚀模数比合作市高出7.21 t·a^{-1}·km^{-2}。

2.2.2 各土地类型土壤侵蚀比较　与合作市相比，天祝县灌木林和各草地类型平均土壤侵蚀模数都呈大幅度增长趋势(图5a)，其中灌木林水土流失增长幅度最大，平均土壤侵蚀模数分别为：中覆盖度草

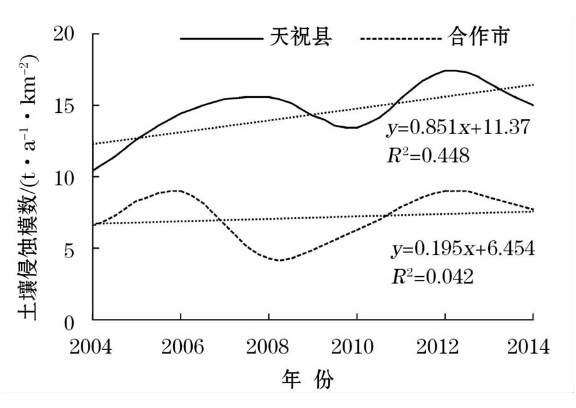


图4　2004—2014年天祝县和合作市土壤侵蚀模数趋势图

Fig. 4　The soil erosion modulus trend in Tianzhu County and Hezuo City from 2004 to 2014

地＞低覆盖度草地＞高覆盖度草地＞灌木林。合作市灌木林和高、低覆盖度草地土壤侵蚀模数呈缓慢增长趋势(图5b)，中覆盖度草地出现缓慢下降趋势，低覆盖度草地土壤侵蚀模数历年均最高。土地单位面积侵蚀强度分别为：低覆盖度草地＞中覆盖度草地＞灌木林＞高覆盖度草地。10余年内天祝县灌木林和草地流失加剧的面积均大于合作市(图5c)，且两研究区高覆盖度草地流失面积增加最多。天祝县疏林和裸岩石质地流失加剧的面积较大，分别占流失加剧总面积的14.31%、7.83%。合作市沼泽地的水土流失面积占水土流失总面积的19.78%。

2.3 研究区土壤侵蚀模数差异分析

通过环境和社会经济因子与草地平均土壤侵蚀模数相关性分析(表5)可知，天祝县年降雨量与草地平均土壤侵蚀模数成显著正相关关系(R = 0.737，P < 0.05)；合作市农牧业人口与草地平均土壤侵蚀模数成显著负相关关系，其相关系数依次为R = −0.829，P < 0.05。2004—2014年，天祝县和合作市草地平均土壤侵蚀模数差值(ΔA_i)与两县年降

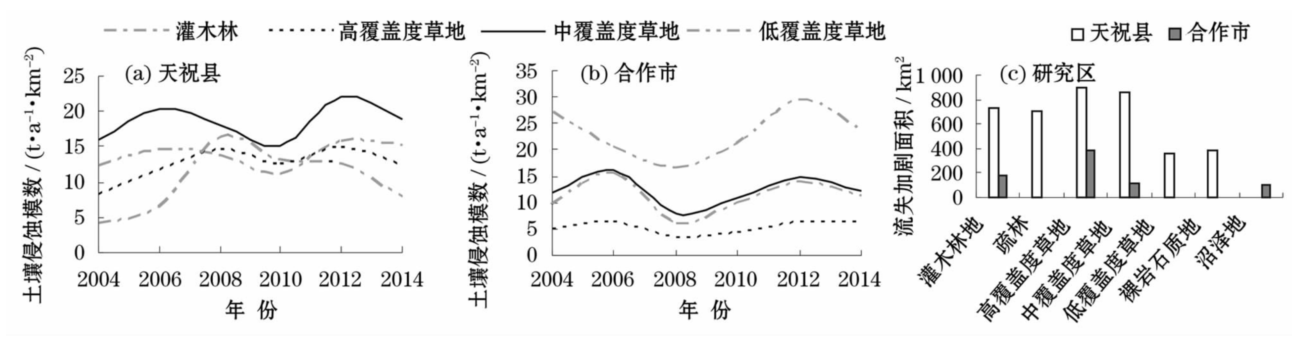


图5　2004—2014年研究区各土地利用类型水土流失趋势

Fig. 5　The soil erosion trend of the land use types in the study area from 2004 to 2014

雨量差值之间不存在相关性($R = -0.06$, $P > 0.05$),说明两县年降雨量差值的年际变化不是引起两者草地平均土壤侵蚀模数差值(ΔA_i)年际变化的主导因素。由甘肃省统计年鉴可知天祝县和合作市草地超载率分别为2.28%、63.91%,合作市草地过牧情况比天祝县严重。利用排除法可知,草地经营模式是造成两县土壤侵蚀模数差异的主导因素。

表5 各因子与草地土壤侵蚀模数之间的关系

Tab.5 Relationship of each factor and the soil erosion modulus in grassland

因子	天祝县		合作市	
	相关系数 R	P	相关系数 R	P
年降雨量	0.737*	0.047	0.575	0.116
农牧业人口	-0.765	0.066	-0.829*	0.041
家畜总量	0.274	0.3	-0.174	0.371
牧业产值	0.594	0.107	0.383	0.227

3 讨论

在草地农业生态系统中,家畜、草地和土壤是一个相互制约相互影响的整体,草地植被退化、产草量和载畜量降低与草地管理制度密切相关[25],草地退化又是导致草地土壤侵蚀加剧的主要因素[5]。本文对比2004—2014年草地单户经营模式和草地联户经营模式管理下的高寒草甸水土流失情况,发现单户经营模式下土壤侵蚀模数高于联户经营模式,且增长速率为联户经营模式的4倍多(图4),同时单户经营模式下各草地类型土壤侵蚀模数增长速率也高于联户经营模式(图5a和5b),水土流失加剧面积为联户经营模式的2倍多(图5c)。天祝县和合作市10余年间草地平均土壤侵蚀模数差值(ΔA_i)与两县年降雨量差值之间不存在相关性,且合作市草地超载过牧情况较天祝县严重。根据超载过牧引起草地退化,草地退化导致土壤侵蚀加剧的思路,合作市理论草地平均土壤侵蚀模数应高于天祝县,但合作市实际草地土壤侵蚀模数反而低于天祝县,且家畜总量与草地土壤侵蚀模数没有相关性,由此说明超载过牧同样不是引起两县草地平均土壤侵蚀模数差值(ΔA_i)年际变化的因素。因此,笔者认为草地经营模式是造成两县土壤侵蚀模数差异的主导因素,且草地联户经营管理模式在控制水土流失方面优于单户经营管理模式。与单户经营模式相比,联户经营模式以联户为单位将草地集中连片,便于生产生活,同时形成的村规民约按照各户的人口规定了能够饲养的最大牲畜数量,从而实现草畜平衡[26]。另外,联户经营模式下牲畜的族群关系不密切,采食时个体行为明显,所以牲畜采食的分布分散,这也是另外一种意义上"轮牧",有利于牧草休养,草场实际载畜量得到增加[27]。Hua等认为联户经营管理方式在控制我国北方土地退化和恢复生态系统有显著成效[28]。曹建军也认为草地利用方式不当是造成草地退化的深层原因,同时发现联户草场的生物量、物种丰富度等均大于单户草场,认为联户经营管理更有利于草地保护[7]。由此可见,联户经营管理模式将人、家畜和草地资源结合在一起,尊重传统游牧文化,在生态效益和生产效益方面都优于单户经营。

土壤侵蚀模型是进行水土流失监测和预报的重要工具,我国学者在各个领域取得了很多研究成果,尤以区域尺度研究最为广泛[29]。近几十年来,修正的通用土壤流失模型在国内外得到广泛应用[13],可利用遥感数据直接参与计算,进行大面积的调查和动态监测。章文波等提出的中国土壤侵蚀模型更倾向于耕地[30],而本研究区域以天然草地为主,选用RUSLE模型,同时根据研究区的区域特点选择匹配的因子,计算所得的天祝县土壤侵蚀模数与令凡等[31]通过径流小区得出的天然草地侵蚀模数基本相同,说明本研究通过模型计算的土壤侵蚀模数可靠。笔者结合RS和GIS技术计算草地水土流失的方法,与曹建军采用随机偶遇抽样调查草场植被特征方法不同[7]。本研究方法能体现两种草地管理模式的历史影响和发展趋势,空间调查尺度大,较好地反映了两种模式对草地水土流失的影响,但在细节和精确度上逊色于曹建军的方法。本研究方法也比调查问卷、典型牧户等方法[6-7]更具有代表性和宏观性,而且长时间序列影响的定量研究也解决了管理经营模式在时间上的延迟性问题和趋势分析问题。

两种经营模式下水土流失量都呈增加趋势,这可能与草地总体超载过牧有关[32]。研究中发现10余年来天祝县和合作市都出现了超载过牧现象。两研究区10余年间灌木林水土流失量都呈增长趋势,主要是因为灌木林位于海拔较高的夏季牧场,而夏季牧场都是公共放牧区域,管理较弱造成了"公地悲剧"[33]。研究区10余年间高覆盖度草地流失面

积增加最多,但单位面积侵蚀强度低,因为部分高覆盖度草地与灌木林相接,位于夏季公共牧场,因管理因素而侵蚀加剧,也可能是受牧民的主观逐利和中、低覆盖度草地退化严重的影响,牧民在高覆盖度草地放养更多畜群,且延长了放牧时间。本研究还发现合作市连片侵蚀加剧区域土地利用类型主要为沼泽草甸,这与王云川等[34]提取的35 a内若尔盖泥炭沼泽急剧退化现象相似,胡冰殊认为人类活动是造成沼泽湿地退化的主要原因[35]。本研究中水土流失总量和草地平均土壤侵蚀模数都与农牧业人口成显著负相关关系,这与赵雪雁[36]研究结果不一致。主要是因为随着牧业机械化和管理水平的提高,牧区劳动力投入减少,但畜群数量仍呈增长态势,因此造成过牧,引发水土流失加剧。本研究中家畜总数、牧业产值与草地平均土壤侵蚀模数不具备显著相关性,与大多数学者研究结果不同[5],可能是因为搜集的统计年鉴数据存在误差[37],家畜数量和牧业产值的变化也可能是因为人工和改良草地面积的扩大,所以与平均草地土壤侵蚀模数不具备显著相关性。

草地分布具有强烈的空间异质性,两研究区域在降雨、地形和草地类型方面都存在较大差异。本研究发现合作市年均降雨量为天祝县的2倍多,因此合作市的植被覆盖度高于天祝县,这可能是天祝县水土流失量高于合作市的一个原因。天祝县水土流失最剧烈的区域是裸岩石质地,占全域面积的7.15%,此处属于高山砾石区,植被覆盖度最低,而合作市的裸岩石质地仅占全域面积的0.51%,这也可能造成天祝县水土流失总量比合作市高。尽管天祝县和合作市都属于纯牧业县,但天祝县位于河西走廊,受干旱气候的影响较合作市更大,其生态脆弱程度比合作市更高,草地经营模式对控制水土流失难度更大,可能会对结果有一定影响。另外,Landsat 7/ETM+的影像数据存在条带现象,部分数据丢失,虽经过条带修复,但还是会对结果有一定影响。

4 结 论

本研究选择甘肃单户承包草地经营为主的天祝县和联户经营为主的合作市为研究区,分析了2004—2014年两种草地管理模式下水土流失趋势,发现两县均出现水土流失加剧的趋势,但单户经营的天祝县较联户经营的合作市水土流失状况严重。利用排除法发现,草地经营模式是造成草地退化和水土流失的主要因素。由此可见联户经营模式更有利于控制水土流失。

参考文献(References):

[1] 孙鸿烈. 我国水土流失问题与防治对策[J]. 中国水利,2011(6):16.[Sun Honglie. Problems and countermeasures of soil and water loss in China[J]. China Water Resources,2011(6):16.]

[2] 李智广,曹炜,刘秉正,等. 我国水土流失状况与发展趋势研究[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.[Li Zhiguang, Cao Wei, Liu Bingzheng, et al. Study on the status and development trend of soil erosion in China[J]. Science of Soil and Water Conservation,2008,6(1):57-62.]

[3] Pimentel D. World Soil Erosion and Conservation[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1993:607-609.

[4] 刘玉平,王桥,王文杰,等. 中国西部地区水土流失状况[J]. 水土保持学报,2001,15(6):17-19.[Liu Yuping, Wang Qiao, Wang Wenjie, et al. Present situation of water erosion in west China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(6):17-19.]

[5] 荣浩,刘铁军,何京丽. 荒漠草地水土流失监测指标关键性分析研究[C]//全国水土保持与荒漠化防治及生态修复交流研讨会,2009:170-173.[Rong Hao, Liu Tiejun, He Jingli. The key analysis and research of monitoring index of soil erosion in desert grassland[C]// Proceedings of The National Symposium on Soil and Water Conservation and Desertification Combating and Ecological Restoration,2009:170-173.]

[6] 吕少宁,文军,康悦. 黄河源区玛曲草原草场退化原因调查分析[J]. 生态经济,2011(2):166-170.[Lv Shaoning, Wen Jun, Kang Yue. A survey study on grassland degradation over the source water region of the Yellow River[J]. Ecological Economy,2011(2):166-170.]

[7] 曹建军. 青藏高原地区草地可持续利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2011.[Cao Jianjun. The Study on the Sustainable Use of Rangelands of the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2011.]

[8] 于靖. 新背景下完善草原家庭承包经营制的探索——以锡林郭勒盟为例[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2012.[Yu Jing. The Studies of Improving the Household Contract Management System in the Grassland Area under the New Background[D]. Hohhot: Inner Mongolia University,2012.]

[9] 朱振宁,朱美玲,刘娜娜,等. 草畜联营合作社组织发展研究——以昌吉回族自治州草畜联营合作社为例[J]. 中国农业资源与区划,2015,36(4):42-47.[Zhu Zhenning, Zhu Meiling, Liu Nana, et al. Breeding pool, cooperative organizations development research: Tatink cooperative organizations in Changji Hui Autonomous Prefecture as example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2015,36(4):42-47.]

[10] 高振荣,田庆明,刘晓云,等. 近58年河西走廊地区气温变化

及突变分析[J]. 干旱区研究,2010,27(2):194 - 203.[Gao Zhenrong,Tian Qingming,Liu Xiaoyun,et al. Characteristics and abrupt change of temperature in the Hexi Corridor in recent 58 years[J]. Arid Zone Research,2010,27(2):194 - 203.]

[11] 曹永林. 天祝县草地资源特征及其生产力分析[J]. 草业科学,2011,28(5):871 - 873.[Cao Yonglin. Analysis of characteristics and productivity of rangeland resource in Tianzhu County[J]. Prataculture Science,2011,28(5):871 - 873.]

[12] 李冬红,尚小生,加杨东知. 禁牧补奖平衡对甘南州草地生产力影响监测[J]. 畜牧兽医杂志,2015(3):118 - 119.[Li Donghong,Shang Xiaosheng,Jia Yangdongzhi. Monitoring of the influence to the productivity for the supplementary award balance of the prohibition of grazing of grassland in Gannan Prefecture[J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine,2015(3):118 - 119.]

[13] Renard K G,Foster G R,Weesies G A,et al. Predicting Soil Erosion by Water:A Guide to Conservation Planning with theRevised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington:United States Department of Agriculture,1997:15.

[14] Wischmeier W H,Johnson C B,Cross B V. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions American Geophysical Union,1958,39(2):285 - 291.

[15] 宋阳,刘连友,严平,等. 土壤可蚀性研究述评[J]. 干旱区地理,2006,29(1):124 - 131.[Song Yang,Liu Lianyou,Yan Ping,et al. A review of soil erodibility research[J]. Arid Land Geography,2006,29(1):124 - 131.]

[16] Williams J R,Renard K G,Dyke P T. EPIC-A new method for assessing erosions effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1983,38(5):381 - 383.

[17] 刘波,王培法,佘江峰,等. 基于 GIS 和 RS 的长清区南部山区水土流失研究[J]. 遥感信息,2009(6):15 - 19.[Liu Bo,Wang Peifa,She Jiangfeng,et al. Soil and water loss research in south mountainous area of Changqing district based on GIS and RS[J]. Remote Sensing Information,2009(6):15 - 19.]

[18] Mccool D K,Brown L C,Foster G R,et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA),1987,30(5):1 387 - 1 396.

[19] Liu B Y,Nearing M A,Shi P J,et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1 759 - 1 763.

[20] 徐雅莉,武红敢,马晓明. 基于遥感和 GIS 技术的土壤侵蚀量估算研究——以澄江太阳山地区为例[J]. 遥感信息,2010(3):73 - 78.[Xu Yali,Wu Honggan,Ma Xiaoming. Study on estimation of the amount of soil erosion based on GIS and RS:Taking the Sun Mountain area of Chengjiang County an example[J]. Remote Sensing Information,2010(3):73 - 78.]

[21] 卜兆宏,孙金庄,周伏建,等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报,1997,34(3):235 - 245.[Bu Zhaohong,Sun Jinzhuang,Zhou Fujian,et al. A study on quantitative remove sensing method of soil erosion and its application[J]. Acta Pedologica Sinica,1997,34(3):235 - 245.]

[22] 郭铌. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象,2003,21(4):71 - 75.[Guo Ni. Vegetation index and its advances[J]. Journal of Arid Meteorology,2003,21(4):71 - 75.]

[23] 杨娟,葛剑平,李庆斌. 基于 GIS 和 USLE 的卧龙地区小流域土壤侵蚀预报[J]. 清华大学学报(自然科学版),2006,46(9):1 526 - 1 529.[Yang Juan,Ge Jianping,Li Qingbin. The soil erosion prediction of small watershed based on GIS and RS in Wolong region[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2006,46(9):1 526 - 1 529.]

[24] 贺红元,车克钧,傅辉恩,等. 祁连山寺大隆林区水土流失状况的初步研究[J]. 水土保持学报,1992,16(1):48 - 56.[He Hongyuan,Che Kejun,Fu Hui'en,et al. A preliminary study of water and soil erosion conditions in sidelong forest region in the Qilian mountain areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1992,16(1):48 - 56.]

[25] 杨思维,花立民,李兴福,等. 北方农牧交错带草地使用权改革研究——以甘肃省永昌县马营沟村为例[J]. 草业科学,2010,27(11):159 - 165.[Yang Siwei,Hua Limin,Li Xingfu,et al. Reformation of grassland use rights in agro-pastoral zone:A case study in Mayinggou Village,Yongchang County,Gansu[J]. Pratacultural Science,2010,27(11):159 - 165.]

[26] Hua L,Yang S,Squires V,et al. An alternative rangeland management strategy in an agro-pastoral area in Western China[J]. Rangeland Ecology & Management,2005,68(2):109 - 118.

[27] 杜国祯. 中国草地退化浅议[C]//中国草原与牧区发展:第 23 届国际保护生物学大会中国草原保护专题研讨会论文集,2009:8 - 14.[Du Guozhen. Discussion on Degradation of Chinese Grasslands[C]//Chinese Grassland and Pastoral Development:The 23rd International Conference on Conservation Biology China Grassland Conservation Symposium Proceedings,2009:8 - 14.]

[28] Hua L,Squires V R. Managing China's pastoral lands:Current problems and future prospects[J]. Land Use Policy,2015,43:129 - 137.

[29] 蔡国强,刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展,2003,22(3):242 - 250.[Cai Guoqiang,Liu Jigen. Evolution of soil erosion models in China[J]. Progress in Geography,2003,22(3):242 - 250.]

[30] 章文波,刘宝元. 基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J]. 水土保持学报,2003,17(2):89 - 92.[Zhang Wenbo,Liu Baoyuan. Development of Chinese soil loss equation information system based on GIS[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,17(2):89 - 92.]

[31] 令凡,焦健. 不同土地利用方式对高寒地区水土流失的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(36):237 - 241.[Ling Fan,Jiao Jian. Effects of different land use on soil and water erosion in alpine areas[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2014,30(36):237 - 241.]

[32] 刘源. 2014 年全国草原监测报告[J]. 中国畜牧业,2015(8):

18－31.〔Liu Yuan. National grassland monitoring report 2014〔J〕. Animal Husbandry in China,2015(8):18－31.〕

〔33〕杨阳阳. 青藏高原不同放牧模式对草地退化影响研究〔D〕. 兰州:兰州大学,2012.〔Yang Yangyang. The Effects of Different Grazing Modes on Grassland of Degradation on the Qinghai Tibeten Plateau〔D〕. Lanzhou:Lanzhou University,2012.〕

〔34〕王云川,易桂花,张廷斌,等. 近35 a若尔盖高原泥炭沼泽变化趋势与驱动力分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(2):403－410.〔Wang Yunchuan,Yi Guihua,Zhang Tingbin ,et al. Change trend and driving force of peatlands in the Zoige Plateau in recent 35 years〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(2):403－410.〕

〔35〕胡冰殊. 黑河源区湿地动态变化分析及驱动力分析〔D〕. 西宁:青海师范大学,2011.〔Hu Bingshu. Research on Monitoring Dynamic Transformation and Driving Force in the Source of Heihe〔D〕. Xining:Qinghai Normal University,2011.〕

〔36〕赵雪雁. 黄河首曲地区草地退化的人文因素分析——以甘肃省玛曲县为例〔J〕. 资源科学,2007,29(5):50－56.〔Zhao Xueyan. Human dimensions of grassland degradation:A case study in Maqu County of Gansu Province〔J〕. Resources Science,2007,29(5):50－56.〕

〔37〕阙乐容,肖海东. 夯实基础提升质量——对当前基层畜牧业统计工作的调查与思考〔J〕. 中国畜牧兽医文摘,2014,30(2):12.〔Que Yuerong,Xiao Haidong. Reinforce the foundation to improve the quality:Investigation and reflection on the statistical work of grassroots livestock〔J〕. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine,2014,30(2):12.〕

Management Regime in Alpine Meadow Based on the Assessment of Soil and Water Erosion

MA Su-jie[1,2], JIA Sheng-hai[1], HUA Li-min[1]

(1. *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;

2. *College of Animal Science*, *Tibet Agriculture & Animal Husbandry University*, *Linzhi* 860100, *Tibet*, *China*)

Abstract: In this study, the RUSLE model and the RS and GIS means were used to estimate the soil erosion in 10 years from 2004 to 2014 in Tianzhu County and Hezuo City in Gansu Province, where the household contract system and allied household contract system were separately implemented. The purposes of this study were to compare the grassland management regime in alpine meadow, improve the rangeland management system, and analyze the correlations between the soil erosion and the annual precipitation, farmer population, livestock number and animal husbandry production value. The reasons causing the difference of soil erosion modulus of grassland in two counties were analyzed by exclusion method. The result showed that: ① Slight soil erosion occurred in both Tianzhu County and Hezuo City. ② The average annual modulus of soil erosion in Tianzhu was 7.21 ($t \cdot a \cdot km^{-2}$) and higher than that in Hezuo City. The increase rate of soil erosion in Tianzhu County was 4 times of that in Hezuo City. The increase of soil erosion modulus of all grassland types in Tianzhu County was higher than that in Hezuo City. ③ There was a significant positive correlation between annual precipitation and soil erosion ($R=0.737$, $P<0.05$) in Tianzhu County. In Hezuo, there was a significant negative correlation between farmer population and average rangeland erosion modulus ($R=-0.829$, $P<0.05$). ④ There was no correlation between the difference of grassland erosion modulus and the annual precipitation difference in both Tianzhu County and Hezuo City ($P>0.05$). The livestock overload rate in Hezuo City was higher than that in Tianzhu County. This study suggests that grassland management model is the main reason causing grassland degeneration and soil erosion, and the allied household management regime is superior to the individual household management regime in controlling soil and water erosion.

Key words: soil erosion; rangeland management model; soil and water loss; alpine meadow; Gansu